



دانش و مفاهیم پایه در فن آوری فضا

دانش و مفاهیم پایه در فن آوری فضا

مؤلفان:

دکتر حسن سالاریه

عضو هیات علمی دانشگاه صنعتی شریف

دکتر فرهاد خالوزاده

عضو هیات علمی دانشگاه امام حسین (ع)



تابستان ۱۴۰۰

سرشناسه: سالاریه، حسن، ۱۳۵۹
عنوان و نام پدیدآور: دانش و مفاهیم پایه در فن آوری فضا/ حسن سالاریه، فرهاد خالوزاده.
مشخصات نشر: تهران: شرکت هوافضای برآ، انتشارات هوانورد، ۱۴۰۰.
مشخصات ظاهری: ۶۱۰ ص.
شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۷۵۹۰-۲۱-۰
وضعیت فهرست نویسی: فیبا
موضوع: ماهوارهها Artificial satellites
ماهوارهها -- مدارها Artificial satellites -- Orbits
ایستگاه‌های فضایی Space stations
صنایع هوافضا Aerospace industries
فضاشناسی Space sciences
شناسه افزوده: خالوزاده، فرهاد، ۱۳۴۰
رده بندی کنگره: TL۷۹۶
رده بندی دیویی: ۶۲۹/۴۶
شماره کتابشناسی ملی: ۸۴۹۲۳۸۹
اطلاعات رکورد کتابشناسی: فیبا



نام کتاب: دانش و مفاهیم پایه در فن آوری فضا
مؤلفان: دکتر حسن سالاریه، دکتر فرهاد خالوزاده
ناشر: هوانورد
نوبت چاپ: اول
سال چاپ: ۱۴۰۰
شمارگان: ۵۰۰
قیمت: ۱۲۵۰۰۰۰۰ ریال
شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۷۵۹۰-۲۱-۰

- ◀ کلیه حقوق چاپ برای ناشر محفوظ است. نقل مطالب فقط با ذکر مشخصات کامل کتاب و با اشاره به نام ناشر مجاز است.
- ◀ برای تهیه این کتاب می‌توانید به وبگاه www.aeroshop.ir مراجعه کنید یا با شماره تلفن ۰۲۱ - ۷۷۸۵۰۲۵۹ تماس حاصل فرمائید.

«والذین جاهدوا فینا لنهدینهم سبلنا و ان الله لمع المحسنین»

«محققاً کسانی که در راه ما جهاد کنند، هدایت خواهیم نمود و برآستی که خداوند با محسنین

است»

(سوره عنکبوت - آیه ۶۹)

نتایج و دستاوردهای این کتاب را که به لطف و رحمت الهی شامل حال گردیده است، خاضعانه و خالصانه

تقدیم می‌کنم به:

روح پرفتوح و عظیم‌الشان پیامبر اسلام حضرت محمد مصطفی (ص)، ائمه اطهار (ع)، شهدای عظیم‌الشان کربلا و خانواده والامقامشان، بقیه‌ا... اعظم حضرت حجت بن الحسن العسگری (عج) و نایب برحقش امام سید علی خامنه‌ای.

تقدیم می‌کنم به:

روح پرفتوح شهدا و امام خمینی (ره)، جانبازان و مدافعان حرم که دین و دنیای خود را مدیون فداکاری آنان می‌دانم.

فهرست مطالب

فصل ۱: تاریخچه مکانیک مدارهای فضایی.....	۱۵
۱-۱- مقدمه.....	۱۶
۲-۱- در جستجوی مرکز عالم.....	۱۶
۳-۱- کشف قانون کیهانی.....	۲۰
۴-۱- قوانین حرکت سیاره‌ای کپلر.....	۲۳
۵-۱- تاریخچه ماهواره‌ها.....	۲۵
۶-۱- منابع.....	۳۹
فصل ۲: مکانیک وضعیت.....	۴۱
۱-۲- مقدمه.....	۴۲
۲-۲- سینماتیک و سینتیک ذره.....	۴۲
۱-۲-۲- سینماتیک ذره.....	۴۲
۲-۲-۲- سینتیک ذره.....	۴۵
۳-۲- سینماتیک و سینتیک جسم صلب.....	۴۸
۱-۳-۲- سینماتیک جسم صلب در صفحه.....	۴۸
۲-۳-۲- سینتیک جسم صلب در صفحه.....	۵۴
۳-۳-۲- سینماتیک جسم صلب در فضا.....	۵۷
۴-۳-۲- سینتیک جسم صلب در فضا.....	۶۳
۵-۳-۲- معادلات حرکت.....	۶۴
۴-۲- سینماتیک و سینتیک وضعیت ماهواره.....	۶۵
۱-۴-۲- وضعیت ماهواره.....	۶۵
۲-۴-۲- روش‌های توصیف وضعیت.....	۶۶
۳-۴-۲- سینماتیک و سینتیک وضعیت ماهواره.....	۷۶
۴-۴-۲- استخراج معادلات دینامیکی ماهواره به همراه بوم.....	۸۰
۵-۲- منابع.....	۸۳

فصل ۳: مکانیک مداری	۸۵
۱-۳- مقدمه	۸۶
۲-۳- دینامیک حرکت دو جسم و قوانین کپلر	۸۶
۱-۲-۳- جرم کاهیده و دستگاه مرکز جرم	۸۶
۲-۲-۳- استخراج قانون اول کپلر	۹۰
۳-۲-۳- استخراج قانون دوم کپلر	۹۴
۴-۲-۳- استخراج قانون سوم کپلر	۹۸
۳-۳- مروری بر ساختار فضا	۹۹
۲-۳-۳- مقاطع مخروطی	۱۰۲
۳-۳-۳- پارامترهای مداری	۱۰۳
۴-۳-۳- انواع مدارها	۱۰۶
۵-۳-۳- رابطه سرعت مداری با ارتفاع	۱۱۷
۴-۳- معرفی دستگاه‌های مختصات توصیف حرکت ماهواره‌ها در فضا	۱۱۸
۱-۴-۳- خط اعتدال بهاری	۱۱۸
۲-۴-۳- دستگاه لخت در مرکز زمین	۱۱۹
۳-۴-۳- دستگاه در مرکز زمین و متصل به زمین	۱۲۰
۴-۴-۳- دستگاه مداری زمین مرکز	۱۲۰
۵-۴-۳- دستگاه مداری	۱۲۱
۶-۴-۳- دستگاه بدنه	۱۲۲
۷-۴-۳- دستگاه LLA	۱۲۲
۸-۴-۳- دستگاه افقی مماس بر سطح زمین	۱۲۲
۹-۴-۳- مرجع زمانی	۱۲۳
۱۰-۴-۳- تبدیل بین دستگاه‌های مختصات	۱۲۵
۵-۳- روش‌های تعیین موقعیت، دینامیک و مانور مداری	۱۳۱
۱-۵-۳- روش‌های تعیین موقعیت مداری	۱۳۱
۲-۵-۳- دینامیک مداری	۱۴۲

۱۴۴	۳-۵-۳- اثر دینامیک مداری و گرانش زمین در مدل دینامیکی ماهواره.....
۱۵۴	۳-۶- انواع اغتشاشات گشتاوری و نیروهای اختلالی.....
۱۵۴	۳-۶-۱- اغتشاشات گشتاوری و تأثیر آنها بر وضعیت ماهواره.....
۱۵۸	۳-۶-۲- انواع نیروهای اختلالی و تأثیر آنها بر مدار.....
۱۶۹	۳-۶-۳- مانور مداری.....
۱۷۸	۳-۷-۷- بررسی لایه‌های مختلف جو زمین (فضا).....
۱۷۹	۳-۷-۲- منشاء پیدایش جو در سیاره زمین.....
۱۸۱	۳-۷-۳- ترکیب جو زمین.....
۱۸۲	۳-۷-۴- ساختار جو زمین.....
۱۸۶	۳-۷-۵- برخی ویژگی‌های مهم جو زمین.....
۱۸۷	۳-۸- منابع.....
۱۸۹	فصل ۴: حسگرها و عملگرهای تعیین کنترل وضعیت و مدار
۱۹۰	۴-۱- مقدمه.....
۱۹۰	۴-۲- حسگرهای تعیین وضعیت و مدار.....
۱۹۰	۴-۲-۱- حسگرهای تعیین وضعیت.....
۲۱۱	۴-۲-۲- حسگرهای تعیین مدار.....
۲۱۷	۴-۳- عملگرهای کنترل وضعیت و مدار.....
۲۱۷	۴-۳-۱- عملگر مغناطیسی.....
۲۲۰	۴-۳-۲- چرخ واکنشی و چرخ تکانه‌ای.....
۲۲۳	۴-۳-۳- ژيروسکوپ کنترل گشتاور (CMG).....
۲۲۴	۴-۳-۴- پیشران.....
۲۳۱	فصل ۵: الگوریتم‌های تعیین کنترل وضعیت
۲۳۲	۵-۱- مقدمه.....
۲۳۲	۵-۲- الگوریتم‌های تعیین وضعیت.....
۲۳۲	۵-۲-۱- معرفی الگوریتم‌های فیلترینگ و تخمین وضعیت.....
۲۴۵	۵-۲-۲- الگوریتم‌های جبری.....

۲۴۸	..... تخمین گرهای خطی..... ۳-۲-۵
۲۴۹	..... تخمین گر کالمن توسعه یافته..... ۴-۲-۵
۲۵۲	..... الگوریتم‌های کنترل وضعیت..... ۳-۵
۲۵۲	..... طبقه بندی الگوریتم‌های کنترلی..... ۱-۳-۵
۲۵۳	..... الگوریتم‌های کنترلی مرسوم..... ۲-۳-۵

فصل ۶: کاربردهای عمومی ماهواره..... ۲۶۷

۲۶۸	..... مقدمه..... ۱-۶
۲۶۸	..... تاریخچه خدمات ماهواره‌ای [۲]..... ۲-۶
۲۶۹	..... خدمات ماهواره‌ای [۲]..... ۳-۶
۲۶۹	..... سرویس‌های ماهواره‌ای ثابت (FSS)..... ۱-۳-۶
۲۷۰	..... سرویس ماهواره‌ای موبایل (MSS)..... ۲-۳-۶
۲۷۰	..... سرویس ماهواره‌ای پخش رادیو و تلویزیون (BSS)..... ۳-۳-۶
۲۷۰	..... مزایای سیستم‌های ماهواره‌ای..... ۴-۳-۶
۲۷۱	..... انواع کاربردهای ماهواره..... ۴-۶
۲۷۲	..... پخش مستقیم تلویزیون ماهواره‌ای (Direct-to-Home)..... ۱-۴-۶
۲۷۳	..... خدمات اینترنت و کاربردها [۲]..... ۲-۴-۶
۲۷۴	..... سنجش از دور..... ۳-۴-۶
۳۰۲	..... موقعیت یابی و ناوبری..... ۴-۴-۶
۳۰۸	..... پهنای باند ماهواره‌ای..... ۵-۶
۳۱۰	..... مراجع..... ۶-۶

فصل ۷: تشریح سرویسهای ماهواره‌ای..... ۳۱۱

۳۱۲	..... مقدمه..... ۱-۷
۳۱۳	..... سیستم مکانیابی جهانی (GPS)..... ۲-۷
۳۱۴	..... تاریخچه..... ۱-۲-۷
۳۱۷	..... مفاهیم کلی GPS..... ۲-۲-۷
۳۱۸	..... مقدمه‌های بر محاسبه مکان..... ۳-۲-۷

۳۲۰	.....GPS تصحیح زمان گیرنده
۳۲۱	.....ساختار
۳۲۷	.....کاربرد
۳۳۱	.....شیوه ارتباطی
۳۳۶	.....آنالیز خطا و افزایش دقت
۳۴۰	.....سیستم مکانیابی روسی (GLONASS)
۳۴۱	.....تاریخچه
۳۴۵	.....تشریح سیستم
۳۵۳	.....وضعیت فعلی
۳۵۵	.....سیستم مکانیابی چینی
۳۵۵	.....تاریخچه
۳۵۶	.....نحوه کارکرد سیستم بیدو-۱
۳۵۸	.....سیستم جهانی (Compass navigation system یا BeiDou-2)
۳۶۲	.....تصحیح سیستم مکانیابی جهانی
۳۶۲	.....سیستم تصحیح زمینی
۳۶۸	.....سیستم تصحیح ماهواره‌های
۳۷۸	.....سایر سیستم‌های ناوبری
۳۷۸	.....سیستم ناوبری اروپایی (Galileo)
۳۷۹	.....سیستم ناوبری هندی (IRNSS)
۳۸۱	.....سیستم‌های تصویربرداری ماهواره‌های
۳۸۱	.....ماهواره‌های غیرنظامی
۳۹۶	.....ماهواره‌های نظامی
۳۹۸	.....تقسیمات فرکانسی
۳۹۹	.....L band-۲-۸-۷
۴۰۱	.....S band-۳-۸-۷
۴۰۳	.....C band-۴-۸-۷

۴۰۴..... X-band-۵-۸-۷

۴۰۵..... Ku-band-۶-۸-۷

۴۰۸..... K-band-۷-۸-۷

۴۰۸..... Ka-band-۸-۸-۷

۴۰۸..... سایر باندهای فرکانسی ۹-۸-۷

۴۰۹..... مراجع ۹-۷

فصل ۸: معرفی و دسته‌بندی ماهواره‌ها و شرکت‌های فعال ۴۱۵

۴۱۶..... ۱-۸- شرکت‌های فعال در زمینه ماهواره

۴۱۷..... ۱-۱-۸- شرکت‌های انتقال اطلاعات و واسطه‌های دستگاه‌های Tranponder

۴۴۶..... ۲-۱-۸- شرکت‌های توزیع کننده سخت‌افزار ماهواره

۴۵۸..... ۳-۱-۸- شرکت‌های ارائه دهنده خدمات مشاوره‌ای، تکنیکی و مهندسی

۴۷۶..... ۴-۱-۸- شرکت‌های فعال در زمینه نصب و نگهداری سرویس‌های ماهواره‌ای

۴۷۸..... ۵-۱-۸- خدمات شبکه‌ای ماهواره‌ها

۴۸۱..... ۶-۱-۸- مدیریت شبکه برای سیستم‌های VSAT

۴۸۲..... ۷-۱-۸- خدمات ویدئو کنفرانس و شبکه

۴۸۴..... ۲-۸- ماهواره‌های تجاری

۴۸۵..... ۱-۲-۸- مخابرات (موبایل و تلفن ثابت)

۵۱۱..... ۲-۲-۸- اینترنت

۵۲۲..... ۳-۲-۸- پخش رادیو و تلویزیون

۵۴۹..... ۴-۲-۸- متفرقه (تصویربرداری از زمین، اهداف تحقیقاتی و ...)

۵۹۲..... ۳-۸- ماهواره‌های نظامی

فصل ۱: تاریخچه مکانیک مدارهای فضایی

۱-۱ - مقدمه

علم مکانیک مدارهای فضایی، بخشی از دانش فضایی است که به بررسی حرکت اجرام سماوی اعم از طبیعی و مصنوعی تحت اثر مستقیم گرانش سایر همسایگان فضایی خود می‌پردازد. برای درک صحیح این علم باید به صدها سال قبل برگردیم، یعنی به زمانی که یافتن مدلی صحیح جهت پاسخگویی به چگونگی حرکت اجرام منظومه شمسی نسبت به هم بزرگترین هدف اندیشمندان آن روزگار بوده است. در این راه خواهیم آموخت که مباحثات فراوان بر سر یافتن مرکز عالم چگونه پای نوع بشر را به فضا باز کرد.

در پایان این فصل اطلاعات مربوط به اولین ماهواره‌هایی که تکنولوژی فضایی را ارتقا دادند شامل اولین ماهواره‌ی پرتاب‌شده در تاریخ ۴ اکتبر ۱۹۵۷ توسط اتحادیه جماهیر شوروی با نام Sputnik 1 تا ماهواره MERIDIAN 4 که در تاریخ ۴ می ۲۰۱۱ به فضا پرتاب شد، ارائه شده است.

۱-۲ - در جستجوی مرکز عالم

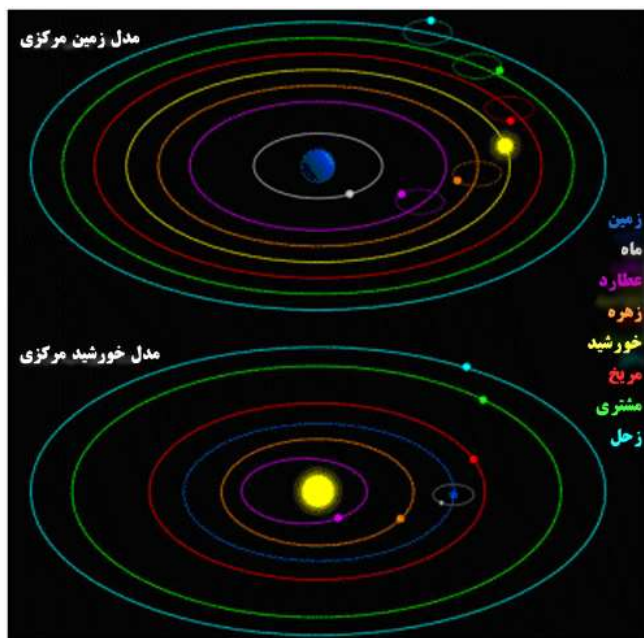
قرن‌ها قبل از اینکه بشر حتی به فکر سفر به فضا بیافتد و یا آرزوی بودن در سرزمین دیگری غیر از زمین را در سر راه دهد، صحبت درباره مدارهای فضایی محدود به مدار سیارات و ستاره‌ها به دور زمین می‌شده است. در طول تمام آن سال‌ها مدل‌های مختلف و متنوعی از حرکت اجرام سماوی ارائه گردید. برخی از آنها چنان در عمق جان مردم خانه کرد که تا چند هزار سال حاکم مطلق آسمان بودند و برخی دیگر تنها توسط ارائه‌دهنده خود به رسمیت شناخته می‌شدند. در ودا، کتاب مقدس هندوها که مجموعه نوشته‌شده‌ای از تعالیم مکتب هندویی در روزگاران بسیار کهن است، بارها قید شده که زمین به دور خورشید می‌چرخد و خورشید مرکز عالم است. از گفته‌های حکیم بزرگ هندو، یاجناوالکیا که حدود قرن هشتم و نهم قبل از میلاد می‌زیسته است، کاملاً آشکار است که وی معتقد بوده زمین به شکل کره است و خورشید مرکز کره سماوی (جهان) است.

در ودا می‌توان نکات آموزنده‌ای از میزان دانش هندوان باستان نسبت به فضا به دست آورد. برای مثال در نوشته‌های یک برهمن هندو، فاصله زمین تا خورشید با دقت شگفت‌آوری اندازه گرفته شده است. ارسطو، فیلسوف شهیر یونانی در حدود ۳۵۰ قبل از میلاد مسیح، مدلی از جهان ارائه داد که برای حدود ۲۰۰۰ سال مبنای نگاه بیشتر جامعه علمی دنیا به محیط اطراف خود بود. ارسطو معتقد بود که خورشید، سیارات و تمامی ستاره‌ها در مداری کاملاً دایره شکل به دور زمین که در مدل او ثابت و فاقد حرکت فرض شده بود، می‌چرخند.

او در فصل ۱۳ از کتاب دوم مجموعه «در آسمانها» عقیده دانشمندان یونانی قبل از خود را درباره آسمان چنین بیان می‌کند: «آنگونه که می‌گویند در مرکز عالم آتشی بزرگ افروخته شده است و زمین یکی از

ستاره‌هاست که بر دور آتش می‌چرخد و به واسطه آن روز و شب پدید می‌آید.» ارسطو این نظریه را رد کرد و زمین را مرکز عالم فرض نمود (شکل ۱-۱).

در طی قرن‌ها، نفوذ عقیده ارسطویی در اذهان مردم به قدری قوی و استوار شده بود که کلیسای کاتولیک پس از رسیدن به قدرت این تئوری را به عنوان مبنای دیدگاه خود نسبت به جهان هستی پذیرفت و با قدرت و نفوذ معنوی خود جایگاه آن را محکم‌تر کرد. نتیجه مستقیم چنین اعمال نفوذی از سمت کلیسای کاتولیک این بود که گالیله هنگامی که پس از ۱۹۵۰ سال عقیده خود را که مخالف مدل ارسطویی بود، اعلام نمود، دستگیر و تهدید به اعدام شد.



شکل ۱-۱. مقایسه دو مدل زمین مرکزی و خورشید مرکزی

آریابهاتا ریاضیدان و منجم بزرگ هندی در اوایل قرن ششم میلادی در کتاب خود که آریابهاتیا نامیده می‌شود، به تبعیت از اسلاف هندی خود، مدل خورشید مرکزی را ارائه نمود و تأکید کرد که زمین علاوه بر چرخش به دور خورشید، به دور خود نیز می‌چرخد. همچنین طبق اسناد به دست آمده تا امروز، آریابهاتا اولین کسی است که به بازتاب نور خورشید از سطح ماه و سایر سیارات منظومه شمسی اشاره کرده و دلیل روشن بودن آنها را این موضوع اعلام نموده است. همچنین در کمال تعجب مشاهده می‌کنیم که وی اولین کسی بوده که به بیضی بودن مدار سیارات به دور خورشید اشاره می‌نماید (شکل ۱-۲).

دانشمند دیگری از هندوستان به نام بهاسکارا که در سال‌های ۱۱۱۴ تا ۱۱۸۵ میلادی می‌زیسته است در رساله خود به نام «سیددهانتا شیرومانی» مدل مدارهای بیضی‌شکل آریابهاتا را بسط داده و به نقش گرانش در ایجاد چنین نظم‌ی اشاره کرده است. بهاسکارا همچنین اشاره کرده که سرعت حرکت سیارات در گردش به دور خورشید همیشه یکسان نیست. دانشمندان مسلمان «سیددهانتا شیرومانی» را چند سالی پس از نگارش توسط بهاسکارا به عربی ترجمه کردند و نسخه لاتین آن نیز از قرن سیزدهم در اختیار اندیشمندان جهان غرب قرار داشت. بعید به نظر نمی‌رسد که دانشمندانی مانند کپرنیک یا کپلر با الهام گرفتن از چنین اثری تئوری‌های خود را مطرح کرده باشند.

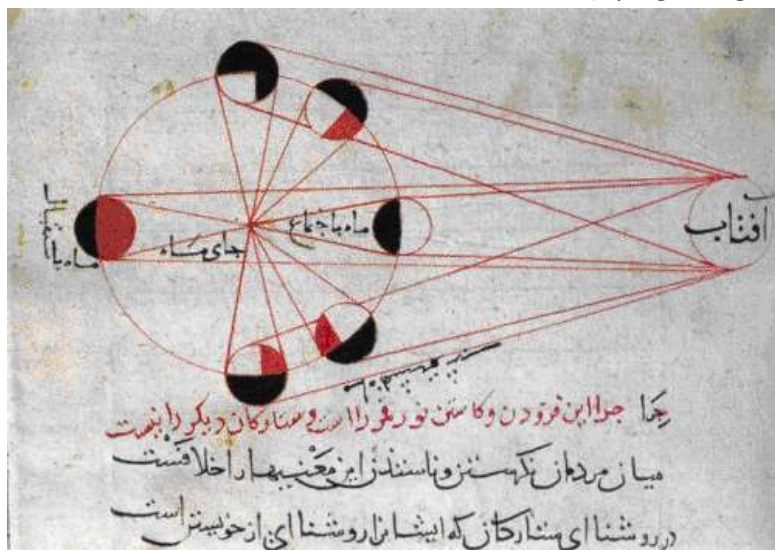


شکل ۱-۲. مجسمه‌ای از آریابهاتا در محوطه مرکز ستاره‌شناسی دانشگاه هند

تفکر دانشمندان مسلمان ستاره‌شناس که به طور عمده ایرانی بوده‌اند نیز بر عقیده خورشید مرکزی استوار بوده است. البته تأثیر فراوان فلسفه ارسطویی بر دانش و فرهنگ مسلمانان بسیار زیاد بود به‌گونه‌ای که

در اغلب نوشته‌های به دست آمده از آن زمان می‌توان به ملغمه‌ای از تفکر هندی-یونانی رسید که بر قلب و ذهن اندیشمندان مسلمان سایه انداخته بود. ابوریحان بیرونی که در قرن دوازدهم میلادی می‌زیسته است در کتاب «التفهیم» خود به خورشید مرکزی عالم، اشاره کرده است. او زمین را به شکل کره می‌دانسته و محاسبات جغرافیایی بسیار دقیقی دارد. بیرونی مسیر ظاهری خورشید در آسمان، گردش محوری زمین و جهات شمال و جنوب را به طور دقیق محاسبه و تعریف کرده است. خورشیدگرفتگی هشتم آوریل ۱۰۱۹ میلادی را پیش‌بینی و آن را در کوه‌های لغمان (افغانستان کنونی) رصد و بررسی کرد. او همچنین زمان دقیق ماه‌گرفتگی پاییز همان سال را محاسبه و در غزنه به رصد آن پرداخت (شکل ۳-۱).

بیرونی در کتاب «بررسی همه جانبه روش‌های ساخت اسطرلاب» از اسطرلابی موسوم به زورقی یاد می‌کند که ابوسعید سجزی آن را ساخته بود و برخی اندیشمندان را گمان بر آن است که سجزی به حرکت وضعی و انتقالی زمین و نظریه خورشید مرکزی معتقد بوده است. ابوسعید احمد بن عبدالجلیل سجزی، ستاره‌شناس و ریاضی‌دان بزرگ و مشهور قرن نهم و دهم میلادی و از اهالی سیستان بوده است. ابوسعید سجزی از دانشمندانی است که زیج مأمونی را بنیاد کرد و همچنین برای مأمون خلیفه عباسی، رصدخانه‌ای احداث نمود. وی محیط کره زمین را محاسبه نمود به طوری که تفاوت آن با محاسبات کنونی فقط چند متر اختلاف دارد. ابوریحان بیرونی دربارهٔ این اسطرلاب می‌گوید: از ابوسعید سجزی، اسطرلابی از نو واحد بسط دیدم که شمالی و جنوبی مرکب نبود و آن را اسطرلاب زورقی نامند و او را به جهت آن تحسین نمودم.



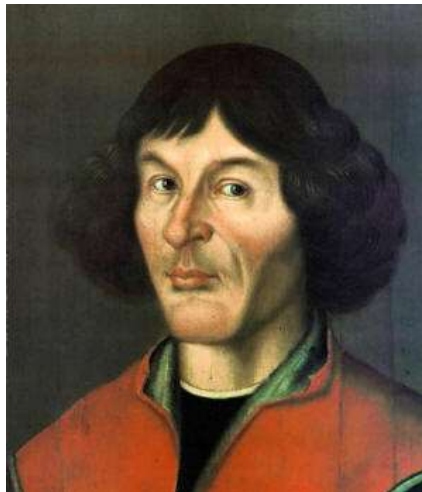
شکل ۳-۱. بخشی از نوشته‌های بیرونی در توصیف ماه‌گرفتگی

خواجه نصیرالدین طوسی در قرن سیزدهم میلادی جدول بی نظیری از مکان و زمان رؤیت اجرام سماوی به رشته تحریر درآورده که به «زیج ایلخانی» مشهور است. آنچه از نوشته‌های او به دست می‌آید نشان می‌دهد که مدل زمین مرکزی پیشرفته‌ای را قبول داشته که قادر به توجیه تمامی حرکات سیارات و خورشید بوده است.

۱-۳- کشف قانون کیهانی

ستاره‌شناسی یا آن‌گونه که قدما می‌گفتند، نجوم، در زمان کپرنیک طرفداران بسیاری داشت. اطلاعات متعددی که از رصد‌های مداوم و به نسبت دقیق زمان نیکلاس کپرنیک (حدود ۱۵۰۰ سال بعد از میلاد) به دست می‌آمده با مدل بطلمیوسی مطابقت نداشت و منجمان با توسل به ترفندهای مختلف سعی در توجیه عدم تطابق‌ها با این مدل داشتند. کپرنیک نیز با همین انگیزه دست به کار شد تا مدلی غیر بطلمیوسی برای عالم تنظیم کند که به‌وضوح می‌توان ردپای دستاوردهای منجمین مکتب مراغه (رصدخانه مراغه) را در کارهای وی مشاهده کرد.

کپرنیک که علاوه بر نجوم، دستی قوی در ریاضیات نیز داشت، با مطالعه دقیق حرکت سیارات در زمان‌های مختلف و با استفاده از علم مثلثات توانست مدلی ارائه دهد که با حرکت ظاهری سیارات، خورشید و ستاره‌ها هم‌خوانی داشت. در مدل کپرنیک زمین دیگر مرکز عالم نبود و همانند سایر سیاره‌ها به دور خورشید می‌چرخید. در آن زمان برای اروپاییان این تئوری جدید که بر پایه آن زمین هم‌سطح سایر سیارات منظومه شمسی فرض شده بود، به قدری غیرقابل باور بود که اصلاً با استقبال همراه نشد.



شکل ۱-۴. نیکلاس کوپرنیک (۱۴۷۳-۱۵۴۳ میلادی)، ستاره‌شناس و ریاضیدان لهستانی که نظریه خورشیدمرکزی منظومه شمسی را بسط داد